

A NEW HISTORY OF LIFE. THE RADICAL NEW DISCOVERIES ABOUT THE ORIGINS AND EVOLUTION OF LIFE ON EARTH

Por Peter Ward y Joe Kirschvink. Bloomsbury, Londres-Nueva York, 2015.

Origen de la vida

Aparición de los primeros organismos

La historia de la vida está escrita en piedra, aunque no solo. Las cadenas de ADN registran sus pasos sucesivos. El avance de nuestra comprensión sobre cómo se originó la vida en una Tierra inicial con mimbres de materia inerte ha ido de la mano de nuestra capacidad para remedar el proceso en el laboratorio. Jack Szostak, premio nóbel, y su equipo llevan más de veinte años experimentando con moléculas que terminaron por desarrollarse en ARN [véase «El origen de la vida», por Alonso Ricardo y Jack W. Szostak; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2009]. Buscan obtener nucleótidos en solución para enlazarlos luego en cadenas cortas de ARN. Enhebrarlos en una cadena resulta más sencillo que conseguir que se reproduzcan, una vez constituidos. Para lograrlo hay que unir al menos una treintena de esos nucleótidos, longitud mínima requerida para que la molécula de ARN adquiera una nueva propiedad: se convierta en catalizador y, de ese modo, promueva la activación de reacciones químicas; en particular, la reproducción del ARN en dos copias idénticas.

Para forjar, en los primeros momentos, dos hebras de ARN de una treintena de nucleótidos pudo contarse, a buen seguro, con la presencia de arcilla como molde. Un material arcilloso, la montmorillonita, parece el más indicado. En un escenario verosímil, los nucleótidos sueltos, que flotarían en un líquido, serían bombeados hacia la arcilla. Con esta se enlazarían débilmente y allí persistirían. En zonas arcillosas se formarían, pues, cadenas de 30 o más nucleótidos, que en razón de su frágil unión podrían romperse con facilidad. De alcanzarse alguna suerte de concentración de estas cadenas, que luego queda-

ran englobadas en una burbuja de líquido rica en lípidos, tendríamos los primeros componentes de una protocélula. Adquiriría esta una doble pared de lípidos con pequeñas cantidades de ARN en su interior; los nucleótidos pasarían por las grietas de la pared. Para funcionar, la célula necesitaría energía, lo que implicaba disponer de una maquinaria química apropiada. En el interior de las esferas habría, pues, distintos tipos de moléculas.

Tras decenios de investigación experimental y teórica sobre el origen de la vida se han cosechado importantes descubrimientos sobre las condiciones químicas y físicas bajo las cuales pudieron sintetizarse y polimerizarse compuestos orgánicos. Sin embargo, tales condiciones parecen mutuamente excluyentes, porque raramente se dan en un mismo asentamiento ambiental.

La vida hubo de esperar a que la temperatura planetaria se enfriara muy por debajo de la reinante en los primeros mil millones de años de historia de la Tierra, una de las múltiples razones para pensar que pudo haberse sintetizado en otro planeta, Marte por ejemplo. (O Venus. En el comienzo pudo haber estado en la zona habitable del Sol, aunque ahora tenga una temperatura superficial de 500 grados debido a un efecto invernadero que a buen seguro esterilizó su superficie.) El registro geológico de Marte pone de relieve que hubo allí cursos de agua. Agua que ahora se ha evaporado en el cuasivacío de su atmósfera o está helada. Si hubo vida en Marte, podría seguir habiendo en su subsuperficie, alimentada por la energía geoquímica de su degradación radiactiva.

Hace más de 4600 millones de años se formó una proto-Tierra a partir de la

coalescencia de planetesimales (cuerpos pequeños de rocas y gases congelados que se condensaron en el plano de la eclíptica, la región plana del espacio donde orbitan todos los planetas). El nuevo planeta comenzó una transformación radical. Hace unos 4560 millones de años, la Tierra empezó a dividirse en capas, cuya región más interna era un núcleo compuesto de hierro y níquel, rodeado por una región de menor densidad llamada manto. Estaba envuelta en una atmósfera de vapor y dióxido de carbono. Pese a carecer de agua en la superficie, pudo haber almacenado un gran volumen en su interior y hallarse en la atmósfera en forma de vapor. Los elementos ligeros se transfirieron hacia arriba y los más pesados se asentaron en el suelo. Nacida en Marte, o en otro lugar, llegaría transportada hasta aquí en meteoritos.

A cuatro hipótesis principales puede reducirse un plausible origen de la vida en el contexto global de las condiciones de la Tierra en la era Hadeana: primera, hubo múltiples microambientes que contribuyeron a la construcción de bloques componentes de la vida; segunda, hubo catalizadores minerales que centralizaron redes de reacciones prebióticas que condujeron a un metabolismo moderno; tercera, se requirieron múltiples procesos de transporte local y global, esenciales para concatenar reacciones que ocurrían en lugares diversos; y cuarta, la diversidad global y la selección local de reactivos y productos aportaron mecanismos para la generación de la mayoría de los distintos bloques de construcción necesarios para la vida.

La primera mitad del siglo XVIII fue el tiempo en que nació el campo de la geología y se fraguó la escala geológica temporal que conocemos. En esas fechas, se definieron las diversas eras, épocas y períodos. Antes de 1800 se creía que cada tipo de roca pertenecía a una edad específica. Se presumía que las ígneas y metamórficas, el núcleo de todas las montañas y volcanes, eran las rocas más antiguas de la Tierra. Las sedimentarias serían más jóvenes, resultantes de una serie de inundaciones que abarcaron el mundo entero. Este principio, denominado neptunismo, predominó y se desarrolló hasta el punto de que se pensara que determinados tipos de rocas sedimentarias presentaban edades específicas.

Pero en 1805 se produjo un descubrimiento que modificó de plano el estado de la cuestión. William «Strata» Smith observó que no era el orden de tipos lito-

lógicos lo que determinaba su edad, sino el orden de los fósiles en el interior de las propias rocas; ellos podían ser utilizados para fechar y poner en correlación estratos de localidades muy alejadas. Puso de manifiesto que las rocas podían tener edades muy diferentes y que la misma sucesión de tipos de fósiles podía hallarse en distintas regiones. La diferencia en contenido fósil podía emplearse para escalonar una sucesión de rocas donde abundaran fósiles. Hasta el momento, la unidad fosilífera de tiempo más antigua es el Cámbrico, que debe su nombre a una tribu de Gales. Todas las rocas anteriores a esta se clasificaron como precámbricas. Desde el Cámbrico en adelante, las rocas fosilíferas se denominarían fanerozoicas. La era Proterozoica, la postrera antes del advenimiento de los animales, siguió a dos eras anteriores, la arquea y la hadeana. El Fanerozoico se dividió, a su vez, en Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

La historia de la vida se ha visto más afectada por episodios de violencia, por catástrofes, que por la suma del resto de las fuerzas, incluida la evolución lenta y gradual defendida por Charles Darwin. El principio guía de la geología a lo largo de más de dos siglos fue el uniformitarismo, establecido por James Hutton y Charles Lyell. El descubrimiento del impacto de un asteroide que mató a los dinosaurios y sacudió a nuestro planeta hace 60 millones de años supuso el abandono de esa doctrina en favor del neocatastrofismo.

Nosotros participamos de una vida fundada en el carbono, cuyos componentes son macromoléculas tejidas con largas cadenas. Pero hubo tres moléculas que existían como gases simples y ejercieron una influencia determinante en la historia de la vida: oxígeno, dióxido de carbono y sulfhídrico. El azufre pudo muy bien haber sido el elemento más importante en la naturaleza e historia de la vida en este planeta. En otro orden, aunque las especies medraron y evolucionaron, debemos a los ecosistemas y su dinámica el ensamblaje de la vida. Pensemos en la importancia crucial de los arrecifes de coral, las selvas tropicales o la fauna de los humeros submarinos.

Hace unos 3800 millones de años, aun cuando hubiera pasado lo peor de la cascada de meteoritos impactantes, persistirían las colisiones violentas. La duración del día no llegaba a las diez horas porque el giro de la Tierra era más rápido. El Sol sería más tenue, un globo rojo quizá de escaso calor, por cuanto no solo producía

muchísima menos energía que hoy, sino que tenía que brillar a través de una atmósfera tóxica, compuesta de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, vapor y metano; no había oxígeno, ni atmosférico ni oceánico. El firmamento aparecía teñido de un naranja o rojo ladrillo, y los mares, que cubrirían la faz de la Tierra, de un marrón limoso.

Uno de los requisitos previos críticos para el origen de la vida sobre la Tierra era que tuviera gases atmosféricos reductores para permitir la formación de moléculas prebióticas. Para la vida en la Tierra, las fuentes primarias de energía proceden de reacciones termonucleares de fusión del Sol. Con mucho, la forma más común en que la vida adquiere energía solar es a través de la fotosíntesis, proceso en el que la luz aporta energía para convertir dióxido de carbono y agua en compuestos de carbono complejos con muchos enlaces químicos que almacenan energía. Con la rotura de estos enlaces se libera energía.

De todas las moléculas que integran la vida en la Tierra, ninguna es más importante que el agua; agua en fase líquida. La vida en nuestro planeta consta de moléculas bañadas en agua. Mientras que el número de moléculas halladas en los organismos es ingente, se reducen a solo cuatro clases los tipos empleados por la vida: lípidos, hidratos de carbono, ácidos nucleicos y proteínas.

A lo largo de más de dos decenios fue incontrovertida la tesis de que el signo más antiguo de vida en la Tierra procedía de un rincón congelado de Groenlandia. En Isua no se descubrieron fósiles. Pero sí se observó que la apatita mineral contenía cantidades microscópicas de dos isótopos diferentes de carbono que mostraban una proporción característica de la vida actual. Las rocas de Isua se fecharon en 3700 millones de años de antigüedad. Una nueva datación acotó la fecha y la cifró en 3850 millones de años. La edad de esas rocas reflejaba que el bombardeo intenso de asteroides había terminado y que la vida podía abrirse camino. Sin embargo, nuevos instrumentos desarrollados ya en el siglo XXI evidenciaron que las pequeñas concentraciones de carbono de las muestras de Isua no habían sido formadas por la vida.

La siguiente muestra de traza de vida más antigua se remonta unos 3500 millones de años. Ahora la declaración se basaba en fósiles, no en señales químicas. En una roca parecida a ágata, William Schopf descubrió ciertas formas filamentosas.

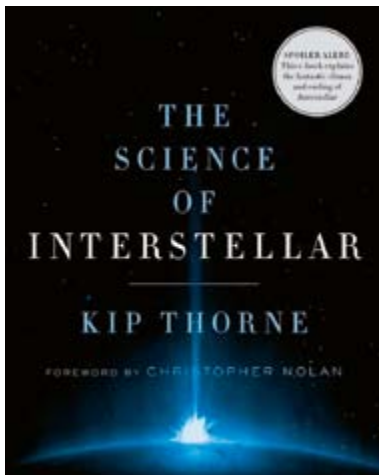
Perteneían a la formación Apex Chert, de Australia. El hallazgo de Schopf mostraba que la vida empezó en nuestro planeta en una fase muy temprana del mismo. Durante una veintena de años esos fósiles fueron aceptados como las formas más antiguas de vida en la Tierra. Pero también la duda se sembró sobre ellos. Martin Brasier, de Oxford, alegó que los así llamados fósiles más antiguos sobre la Tierra eran trazas cristalinas, no reliquias biológicas. Sobre el asunto se desencadenó una enconada polémica. Se llegó incluso a cuestionar la edad de Apex Chert. En 2005, Roger Buick, de la Universidad de Washington, avanzaba que, aunque los objetos de Apex Chert fueran fósiles, las rocas eran mucho más jóvenes de lo que Schopf sostenía. De hecho, más de mil millones de años más jóvenes, lejos de ser la forma de vida más antigua en la Tierra. La hipótesis de Schopf se cuestionó.

Pero en el verano de 2012 firmaba Brasier un artículo en el que demostraba la presencia de vida hace, por lo menos, 3400 millones de años. Se apoyaba en fósiles microscópicos, del tamaño y forma de un tipo especial de bacteria que vive todavía en la Tierra. La forma más antigua de vida medraba en el mar, necesitaba azufre para subsistir y moría prestamente si quedaba expuesta a moléculas de oxígeno. Hoy la vida es una forma basada en el carbono, pero en su origen tuvo al azufre en el centro.

Los fósiles descritos en el artículo de Brasier estaban emparentados con bacterias que persisten en nuestro planeta, bacterias que necesitan azufre elemental para subsistir y mueren cuando se les expone a oxígeno. Los fósiles descubiertos por Brasier proceden de un entorno con temperaturas elevadísimas. Vivieron en un planeta sin continentes, sin tierra firme, salvo cadenas efímeras de islas volcánicas. En ese mundo apareció la vida y pugnó por conservarse. Descendemos de esa cuna y portamos las cicatrices y genes de un origen de la vida abundante en azufre.

A modo de resumen final: hace 4500 millones de años se formó la Tierra; hace 4400 millones de años se estabilizó la hidrosfera; hace entre 4200 y 4000 millones comenzó la química prebiótica; hace unos 4000 millones se creó un mundo pre-ARN; hace 3800 millones apareció el mundo de ARN; hace 3600 millones de años empezó la vida basada en el ADN y las proteínas.

—Luis Alonso



THE SCIENCE OF INTERSTELLAR

Por Kip Thorne (prólogo de Christopher Nolan). W. W. Norton & Company, Nueva York, 2014.

El agujero negro convertido en estrella de cine

Ciencia y ficción en Interstellar

Los admiradores de Einstein y aficionados a su revolucionaria teoría de la gravedad (la teoría general de la relatividad) estamos de enhorabuena este año. A las numerosas actividades, tanto especializadas como de divulgación, motivadas por el centenario de la formulación definitiva de la teoría en noviembre de 1915, se añade la publicación de un magnífico libro dedicado a explicar la abundante ciencia que subyace en *Interstellar*, la taquillera película de 2014 que tiene entre sus estrellas principales ni más ni menos que a un agujero negro, y que incluye secundarios de lujo tales como un agujero de gusano, ondas gravitacionales y un universo con cinco dimensiones.

El autor del libro, Kip Thorne, es un astrofísico y experto en la teoría de la gravedad del Instituto de Tecnología de California (Caltech), jubilado en 2009, que ya tenía experiencia en incorporar la difícil física de la relatividad a la ciencia ficción más exigente: aquella que difiere de la mera ficción fantástica en su decisión de respetar la ciencia que conocemos. En los años ochenta, Thorne había asesorado a su amigo Carl Sagan sobre cómo usar los agujeros de gusano en su novela *Contact*, llevada a la pantalla en 1997 en una película que tiene muchos elementos en común (actor protagonista incluido) con *Interstellar*.

Thorne nos narra la génesis del proyecto de *Interstellar*: en 2005, junto con la productora cinematográfica Lynda Obst, comenzó a jugar con la idea de realizar una película en la que las fascinantes y misteriosas propiedades de los agujeros negros desempeñasen un papel central. Tras muchas vicisitudes, el proyecto acabó en manos de los hermanos Nolan

(el director Chris y el guionista Jonah), quienes se comprometieron a mantener el espíritu original de hacer una película en la que la ciencia estuviese presente de principio a fin.

Thorne impuso dos condiciones muy exigentes sobre el guion: primero, que nada en la película debería violar leyes científicas firmemente establecidas; segundo, que las especulaciones sobre leyes no comprendidas del todo deberían al menos tener un hilo de conexión con la ciencia posible. La tensión entre estos requisitos y las necesidades narrativas de la historia es palpable a lo largo de este libro. Tanto la película como la ciencia descrita en el libro tienen un comienzo sólido y prometedor, que progresivamente se hace más irregular y desemboca en un final con bastantes elementos confusos. Buena parte del libro es un intento de dar una interpretación científica honesta y plausible de aquello que en la pantalla solo se describe mediante imágenes o en brevísimas palabras. Creo que el lector se verá tan sorprendido como yo por el nivel de detalle científico implícito en secuencias que duran apenas unos segundos.

Si bien ha habido grandes películas con un tratamiento serio de la ciencia que involucran —desde la genial *2001: Odisea del espacio* hasta la más reciente *Gravity*— creo que *Interstellar* marca un hito en el género por la diversidad y densidad de conceptos científicos y la finura con la que son tratados. No solo cubre una gran variedad de física gravitatoria; Thorne nos habla de una reunión de ocho horas que mantuvo en Caltech con astrobiólogos, planetólogos, físicos teóricos, cosmólogos, psicólogos y un experto en política espacial, con el fin de

discutir ideas y objeciones que deberían tenerse en cuenta. Así, cuestiones como la posibilidad de una catastrófica plaga que en unas décadas arruine las cosechas de toda la Tierra, o la geología y condiciones para la existencia y evolución de la vida en los planetas que visitan los astronautas, fueron sometidas a escrutinio con el fin de evaluar su plausibilidad y certificar que, cuando no probables, al menos estuviesen dentro de lo que la ciencia nos dice que no es imposible.

Ese respeto a la ciencia ha hecho que las bellísimas imágenes del agujero de gusano cercano a Saturno, del viaje de los astronautas que lo atraviesan, y de Gargantúa, el gigantesco agujero negro junto al que posteriormente aparecen, hayan sido generadas siguiendo las matemáticas de la teoría de Einstein, recurriendo a mínimas licencias artísticas para su adaptación a la pantalla. No sé de otro caso en el que la preparación de una película comercial haya dado lugar a un artículo publicado en una revista científica especializada («Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*», por O. James, E. von Tunzelmann, P. Franklin, K. S. Thorne en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 32, n.º 6, art. 065001, 2015).

De entre los fenómenos científicos que se detallan en el libro, hay dos con los que disfruto especialmente al explicarlos a los amigos que han visto la película. El primero es esencial para la más potente fuente de tensión en la historia: el tiempo en la vecindad de Gargantúa transcurre a un ritmo mucho más lento que en la nave que queda a cierta distancia de él, o que en la Tierra (se nos dice que una hora en el planeta de Miller equivale a siete años en la Tierra). Por increíble que parezca, este efecto entra dentro de la «ciencia bien establecida» de la película.

Ya en 1959 se verificó experimentalmente que, cuanto más intensa es la gravedad, más lento discurre el tiempo. Un reloj en la planta baja de un edificio se retrasa cada día 200 billonésimas de segundo (200×10^{-12} segundos) respecto a un reloj en la azotea, donde, al estar 20 metros más lejos del centro de la Tierra, la gravedad es (muy levemente) más débil. Desde luego, este resultado es demasiado pequeño para que lo notemos y decidamos mudarnos al sótano con el fin de retrasar nuestro envejecimiento. Sin embargo, el mismo efecto se ha incorporado a nuestras vidas en los últi-

mos años a través de la localización GPS. Esta se basa en la sincronización entre el reloj interno del aparato en nuestro coche y la señal emitida desde satélites que orbitan a 20.000 kilómetros de altura. La diferencia de altitud es ahora tal que el retraso diario es de 40 millonésimas de segundo. Si no se tuviese esto en cuenta, en pocos minutos el error en la localización de nuestro aparato de GPS sería de cientos de metros, lo que lo haría inútil para la conducción. Claramente, en la cercanía del intensísimo campo gravitatorio de un agujero negro el resultado será mucho mayor. Aun así, el lector del libro descubrirá que la magnitud del efecto requerida en la película no es fácil de obtener en las situaciones «realistas» más frecuentes en el universo. De todas maneras, encaja cómodamente dentro de lo admisible por las leyes de la física actual.

El otro fenómeno que me gusta discutir es la ola gigantesca que alcanza a los astronautas poco después de que se hayan posado en la superficie acuática del planeta de Miller. De nuevo, aquí tenemos la magnificación extrema de un efecto familiar. Todos sabemos que las mareas las causa la atracción gravitatoria que la Luna (y, en menor medida, el Sol) ejerce sobre la Tierra y sus océanos. Nos resulta entonces fácil entender que las mareas que un agujero negro produzca en un planeta próximo a él se manifiesten como olas descomunales. Pero hay otro efecto interesante implicado. La gravedad no solo desplaza el agua de los océanos, sino que también actúa sobre la roca del planeta. Al ser más rígida, esta reacciona distorsionándose y fragmentándose. En la Tierra, este efecto es muy pequeño, pero en Ío, la luna más próxima a Júpiter, el resultado es una gran actividad sísmica y volcánica. En el planeta de Miller, la intensa atracción del agujero negro sobre la parte rocosa del planeta da lugar a terremotos que originan enormes tsunamis como el que golpea a los astronautas en la película. De nuevo, la comprensión más completa del fenómeno involucra otros detalles finos que el lector encontrará explicados muy claramente en el libro.

La ciencia de *Interstellar* se vuelve mucho más especulativa en los dos últimos capítulos de esta obra, que coinciden con el desarrollo hacia el clímax de la película a partir del momento en que el astronauta Cooper cae al interior del agujero negro. Aquí Thorne nos introduce en ideas de

la física teórica contemporánea (teoría de cuerdas, cosmologías con dimensiones adicionales y universos-brana) que, aunque no estén verificadas experimentalmente, son consistentes con las leyes establecidas y, por tanto, aceptables en la narrativa de ciencia ficción. Pese a que Thorne es un físico teórico muy distinguido y un divulgador avezado, en sus explicaciones se entrevé que estos temas no caen dentro de su especialidad. Esto, unido al carácter alejado de nuestra experiencia de las ideas que se manejan, hace que a partir de este punto el libro resulte más difícil para el lector, que a menudo se ve abocado a «tragar sin digerir» muchas de las ideas que se discuten. Pese a ello, en esto apenas difiere de la mayoría

Thorne nos introduce en ideas de la física teórica que, aunque no estén verificadas experimentalmente, son consistentes con las leyes establecidas

de las publicaciones divulgativas sobre estos temas, y Thorne consigue excitar la imaginación del lector con ideas muy sugerentes.

En los tramos finales del libro, la especulación bordea de manera peligrosa el límite de lo que creemos científicamente posible. En particular, la idea de que se puedan enviar señales gravitatorias al pasado (aun a través de una quinta dimensión) es algo que, creo, la mayoría de los físicos teóricos consideramos muy probablemente incorrecta y tal vez contradictoria con la física de nuestro universo. De hecho, he tenido la impresión de percibir entre líneas la incomodidad de Thorne al tener que justificar, por imperativos del guión, algo que él mismo encuentra difícil de defender. Probablemente sea más adecuado —como él mismo sugiere— que, en lugar de verlo como una mancha en una película con aspi-

raciones de impecabilidad científica, lo tomemos como una licencia al servicio de una buena historia que se mantiene siempre muy por encima del nivel de rigor habitual en el género.

Thorne nos revela muchos otros detalles menores que escapan a buena parte del público, y en cuyo tratamiento esta película es también singular. Por ejemplo, las ecuaciones que aparecen en las pizarras no son simplemente caricaturas matemáticas (con muchas raíces cuadradas, símbolos de integral, etcétera, dispuestos más o menos al azar), sino que corresponden a ecuaciones genuinas que describen la dinámica de la gravedad y las dimensiones adicionales, sacadas de los cuadernos y artículos de físicos de Caltech. Uno de los momentos privadamente más memorables para algunos de nosotros es aquel en que Murph (Jessica Chastain) comienza a escribir en una pizarra la «acción efectiva de la teoría de cuerdas a bajas energías», correctamente y en toda su gloria.

Por desgracia, este esfuerzo tan loable por no caricaturizar la ciencia corre el riesgo de irse al traste cuando se representa la tarea de los científicos: resulta muy poco creíble, por no decir grotesco, que «la solución» que el profesor Brand (Michael Caine) encontró muchos años atrás para «la ecuación de la gravedad» contenga un error del que solo él, y nadie más, se había percatado. Los científicos geniales indudablemente existen, pero sus descubrimientos siempre han sido asimilados con rapidez y escrutados por colegas extremadamente capaces que pueden detectar sus posibles problemas. Es una pena que Thorne haya consentido que la tan manida como falsa imagen del genio individual con ideas fuera del alcance de los demás mortales aparezca en una película con la ambición y logros de *Interstellar*, y que no se haya preocupado de desmentirla en su libro.

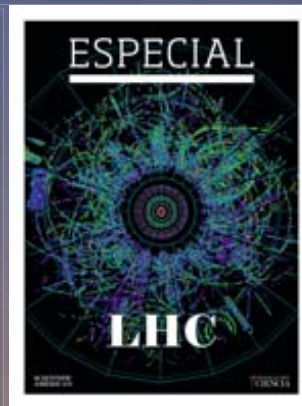
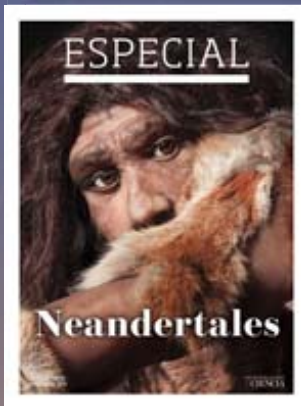
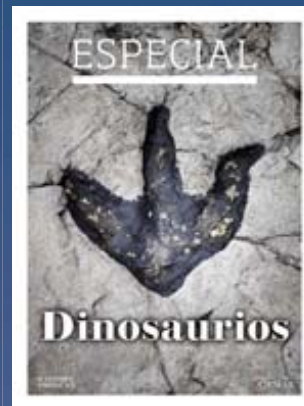
En definitiva, me parece indudable que las virtudes únicas tanto del libro como de la película compensan sobradamente sus defectos e irregularidades, y los convierten en adiciones indispensables a la colección de cualquier buen aficionado a la ciencia moderna y a la más ambiciosa ciencia ficción. Una excelente manera de celebrar el centenario de uno de los mayores logros intelectuales de la humanidad.

—Roberto Empanan
Universidad de Barcelona e Instituto de Ciencias del Cosmos

ESPECIAL

NUEVA REVISTA DIGITAL

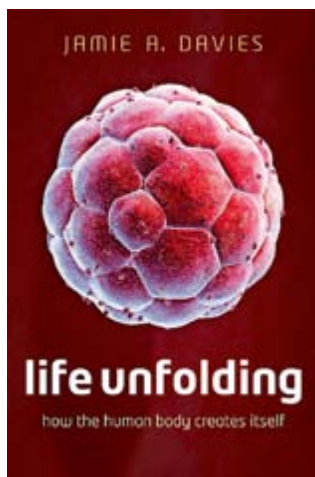
Descubre la nueva publicación que reúne nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas



Prensa Científica, S.A.



LIFE UNFOLDING. HOW THE HUMAN BODY CREATES ITSELF

Por Jamie A. Davies. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Autoorganización

Desarrollo embrionario

El embrión, producto de la fusión de espermatozoide y óvulo, ha sido objeto de atención desde la antigüedad. Pero fue con la introducción de la fecundación in vitro en 1978 cuando la embriología se situó en el primer plano de la investigación científica. Desde la clonación hasta la controversia sobre la ética y la legalidad de la experimentación sobre células madre o la sustitución de ADN mitocondrial, pasando por la medicina regenerativa, la ciencia de cómo y cuándo empieza la vida humana ejerce hoy una poderosa fascinación.

Aristóteles, en el siglo IV a.C., fue uno de los primeros proponentes de la epigénesis, doctrina que defendía que la conformación de una vida procedía de forma gradual. Biólogo de vocación, observó el desarrollo de los embriones de pollo, desde un comienzo de materia amorfa hasta la eclosión del huevo. Se percató de la vinculación del ciclo menstrual con la reproducción y advirtió que la cópula implicaba la mezcla de fluidos del varón y la mujer. La teoría antagonista, la de la preformación, tuvo momentos de esplendor en los siglos XVII y XVIII. Declaraba que el individuo se hallaba, preformado, en la concepción, en espera de su activación. Las lucubraciones languidicieron con el advenimiento de la microscopía, que permitió a Caspar Friedrich Wolff y a Charles Bonnet seguir las primeras fases del desarrollo. La filosofía cedió el testigo a la ciencia experimental.

Propio del método científico es extraer verdades generales a partir de un número limitado de ejemplos. Recordemos que la observación del curso de unos planetas llevó a Kepler a formular las leyes sobre el movimiento planetario; de

ahí pasó Newton a su ley de la gravitación universal. En la estratificación descubierta de unas formaciones rocosas en Escocia apoyó Hutton la primera teoría geológica moderna sobre la Tierra. Las variaciones entre un contado número de especies que había estudiado dieron pie a Darwin para enunciar una teoría de la evolución por selección natural que se aplica a todas las formas de vida. A partir de un número limitado de acontecimientos relacionados con el desarrollo, Davies ofrece aquí un relato exhaustivo de cuanto se sabe sobre el despliegue del cuerpo humano entero a partir un cigoto insignificante.

En el último decenio hemos asistido a una convergencia de disciplinas diversas que han posibilitado la articulación sistemática de la nueva biología del desarrollo. La embriología y neonatología han recabado abundante información anatómica y funcional. La genética y la toxicología identifican causas precisas de anomalías hereditarias que permiten conocer las vías moleculares requeridas en un desarrollo normal. La bioquímica y la biología molecular ahondan en las interacciones entre iones. La biología celular da cuenta de la conjunción de las vías moleculares para tomar el control del comportamiento de la célula. A una escala mucho mayor, la fisiología, la inmunología y la neurobiología descubren las formas en que una muchedumbre de células se comunican y coordinan. Dos términos recurrentes en este contexto son los de emergencia y autoorganización adaptativa. Por emergencia se entiende el proceso en cuya virtud surgen estructuras y conductas complejas a partir de reglas y componentes simples. La

autoorganización adaptativa designa la aplicación de reglas sencillas a los componentes para provocar un producto más inteligente y sutil.

¿Cómo es posible que de un óvulo fecundado surja toda la complejidad de un ser humano, con un cerebro de miles de millones de neuronas, una filigrana reticular de capilares sanguíneos, la solidez de los huesos, la dúctil protección de la piel, el sistema eficiente de adquisición de energía o el mantenimiento de los órganos? Acostumbramos a asociar el embrión a un paisaje autocreador, que añade complejidad a la complejidad y en el que la geografía actual depende de la historia del pasado. El de autoorganización constituye el concepto clave. Proteínas expresadas por genes que operan en conjunción con señales físicas y químicas procedentes del entorno promueven que las células se organicen a sí mismas en un cuerpo. A la complejidad mencionada se llega vía redes de señalización, movimientos a gran escala instados por gradientes de concentraciones químicas y ajuste constante en respuesta a procesos retroactivos. El hilo conductor de las fases embrionarias es la comunicación entre células. En cada paso, una maquinaria proteica detecta señales procedentes del entorno celular; señales mecánicas (tensión, superficie libre) o bioquímicas (moléculas procedentes de otros tejidos) que, combinadas con el estado interno preexistente de cada célula, determinarán qué acontecerá después.

La señalización entre células aumenta la complejidad y enmienda los errores. La complejidad remite al número de tipos celulares y estructuras anatómicamente diferentes. Se parte de una complejidad limitada (un tipo de célula, una estructura) para multiplicarse con el tiempo (miles de tipos celulares, miles de estructuras internas). Y lo que reviste mayor interés: durante la fase más activa del desarrollo, el crecimiento en el número de estructuras se hace de manera aproximadamente exponencial, característica de sistemas que legan a sus sucesores una capacidad incrementada. Para hacernos una idea, pensemos en la población de un cultivo bacteriano: la bacteria inicial crece y se divide en dos, cada una de las cuales se desarrolla y se divide, a su vez, para convertirse en cuatro, que pasarán a ocho, dieciséis, etcétera. El crecimiento exponencial en complejidad ejerce un efecto similar. La complejidad alcanzada aumenta la capacidad de un

embrión de agregar más complejidad en la etapa siguiente. Merced a la comunicación celular.

Se evidencia la flexibilidad de la embriogénesis en la forma en que un tejido puede reclamar el desarrollo de otro para su propio beneficio; así, el tejido hipóxico que necesita el suministro sanguíneo o el control de la proliferación de células madre por señales procedentes de tipos celulares que ellas mismas fabrican. En el corazón de esa flexibilidad encontramos bucles de señalización y de realimentación. La presencia de bucles de realimentación confiere a la comunicación intercelular el carácter de una verdadera conversación, señales que son respondidas por otras señales que retornan, en interdependencia constante. No se requiere ningún constructor ni organizador externo. En biología, la estrategia de construcción depende de la naturaleza de los componentes implicados. Con mucho, las moléculas más importantes de la construcción biológica son las proteínas. De ellas están hechas, en su mayoría, las estructuras físicas que dan a las células su conformación, crean canales y bombas que regulan la entrada y salida de la célula y catalizan las reacciones químicas de la vida. Las reacciones abarcan las vías metabólicas que sintetizan ADN, lípidos e hidratos de carbono.

Las proteínas constan de largas cadenas de aminoácidos; en número de veinte, difieren en su morfología y propiedades químicas e interaccionan unos con otros, lo que significa que las cadenas correspondientes se pliegan en configuraciones complejas. Ese proceso de plegamiento es tan peculiar, que resulta imposible todavía inferir matemáticamente la forma final de una proteína a partir del conocimiento de los aminoácidos de su secuencia. Diferentes proteínas tienen distintas secuencias de aminoácidos. A menudo una proteína puede reconocer puntos de enlace solo en otra proteína específica. Aparecen así complejos constituidos por componentes múltiples que acaban integrando una estructura definida. Estos complejos actúan como máquinas que ponen en funcionamiento reacciones químicas complejas y organizan el ensamblaje de estructuras que, por su tamaño y complicación, no podrían hacerlo por sí mismas.

La asociación entre proteínas para formar complejos se basa en la información que portan las propias proteínas, donde información es aquí sinónimo de

estructura. A gran escala, las estructuras biológicas varían; su disposición exacta se adapta a las circunstancias (una célula se ajusta al espacio que debe ocupar en el tejido). En los sistemas biológicos, se agregan capas de regulación al autoensamblaje químico para producir sistemas que organizan estructuras adaptadas a la circunstancia y la necesidad. No podemos, por fin, olvidar un aspecto peculiar de la construcción biológica: no puede detenerse y comenzar de nuevo para volver a incoar el proceso de construcción. El desarrollo de un embrión viene condicionado por una restricción: cada estadio del desarrollo debe ser compatible con su persistencia en la vida.

El humano adulto consta de un número astronómico de células, que no se distribuyen al azar, sino que se conectan en patrones muy complejos. Se reparten entre cientos de tipos celulares, dotado

**En biología,
la estrategia
de construcción
depende
de la naturaleza
de los componentes
implicados**

cada uno de una estructura y una función. El primer paso significativo en el camino hacia una forma más compleja de ser estriba en la conversión de una célula en multitud de ellas. Escalón necesario, pues cualquier animal complejo requiere realizar muchas cosas diferentes a un mismo tiempo: respirar, digerir alimentos, desintoxicarse de sustancias dañinas, crecer el pelo, formar nuevas células dérmicas, filtrar la sangre, regular la temperatura, oír, etcétera. Esas y otras actividades no mencionadas emplean distintos grupos de proteínas y vías bioquímicas.

Muchas funciones serían incompatibles si se realizaran en el mismo sitio. Los organismos complejos acuden a la compartimentación, aplicando el principio de la separación de cada actividad en su sitio específico. Los cuerpos se dividen en órganos que realizan tareas distintas. Los órganos se dividen, a su vez, en tejidos que abordan funciones diversas. Los tejidos se dividen en células; diferentes tipos

de células cumplen distinta misión. En el interior de cada célula, la mayoría de las moléculas pueden moverse con plena libertad. Existen también compartimentos intracelulares, que desempeñan su propia misión. Ello no obsta para que consideremos la célula como unidad fundamental que realiza una o dos funciones a la vez. De ahí la importancia de contar con una multiplicidad de células diferentes como paso imprescindible para crear un cuerpo complejo.

El huevo fecundado con el que empieza el desarrollo humano es insólitamente grande, de una décima de milímetro de diámetro y visible. La mayoría de las células del cuerpo maduro son mucho menores, de una centésima de milímetro de diámetro y una milésima del volumen del óvulo. Fecundado, puede generar un embrión multicelular por simple división primero en dos, luego en cuatro, luego en ocho, etcétera, sin necesidad de interrumpir el desarrollo. La división de una célula en dos implica compartir todas las moléculas internas (proteínas, por ejemplo) con las células hijas. Con la excepción del ADN: la célula indivisa consta de 46 cromosomas (23 del padre y 23 de la madre); cada una de las células hijas necesita también 46 cromosomas, lo que requiere que se repliquen antes de que empiece cada tanda de división celular. Y lo que es más, ha de haber un sistema que asegure que los cromosomas replicados se alojen equitativamente en las células hijas.

Para la división celular, resulta obligado definir los lugares que se convertirán en centros de las dos células hijas, de suerte que los cromosomas pueden alojarse en su sitio adecuado. En ese paso se requieren dos centrosomas, suerte de nubes de proteínas en torno a sendas estructuras portadoras de tubulina. En cuanto se ha terminado la primera división celular, cada una de las dos células comienza a copiar sus cromosomas y a dividirse. En cuanto el embrión alcanza la fase de 16 células, posee capacidad suficiente para organizar su propia forma. Empiezan las células a diferenciarse entre sí y arranca el desarrollo embrionario. El desarrollo celular requiere suministro de nutrientes para acometerlo. Lo que exige la especialización de determinadas células en esa misión. La especialización celular supone la pérdida de homogeneidad; en adelante, unas células se encargarán de una función y otras de otra. Lo que comporta un nuevo orden y una nueva información.

—Luis Alonso